

L'ORGANISATION MACROSTRUCTURALE DU SOL :
INTERET ET LIMITES D'UNE APPROCHE MORPHOLOGIQUE,
METHODE D'ETUDE

Philippe de BLIC*

I - INTRODUCTION

La structure apparaît pour les pédologues comme une caractéristique majeure des couvertures pédologiques quant à leur fonctionnement actuel et passé (régime hydrique, transferts d'eau, processus physico-chimiques), leur classification, leurs transformations.

Agronomes et phytoécologues s'intéressent à la structure dans la mesure où elle leur permet d'évaluer les qualités trophiques du milieu sol pour la végétation, qui résultent de ses propriétés de transfert et de stockage, ainsi que des propriétés mécaniques qui déterminent la croissance des organes souterrains (STENGEL-1990).

Quels que soient les objectifs et motivations présidant à son étude, la structure peut être définie comme la constitution physique du sol, exprimée par la dimension, la forme et l'arrangement des particules solides (primaires et composées) et des vides associés (McKEAGUE et al.-1988).

La macrostructure du sol représente l'aspect de la structure que l'on peut décrire sur le terrain à l'oeil nu ou sous un faible grossissement. Elle comprend les unités solides et les vides de dimensions supérieures à 0,5mm. La microstructure du sol se réfère à la dimension, la forme et l'arrangement des unités solides et des vides plus petits que 0,5mm.

Cette distinction macro-micro est commode. Elle corrobore bien la partition que l'on peut effectuer de l'espace poral suivant deux ensembles de pores d'origines différentes, à savoir (STENGEL-1979) :

- Un espace poral textural résultant de l'assemblage des particules constitutives du sol.
- Un espace poral structural généré sous l'action de facteurs externes (techniques culturales, climat, organismes vivants) et qui fait référence à une échelle d'observation macroscopique.

Si l'on attache une importance particulière à la description et à la mesure de la macrostructure (et donc de l'espace poral structural) , c'est en raison :

- Du rôle important qu'elle joue dans le contrôle des transferts hydriques rapides (infiltration des pluies, en particulier) et des échanges gazeux, ainsi que dans le développement des systèmes racinaires.
- De ses relations étroites avec les techniques culturales et la faune du sol et des évolutions rapides dont elle est susceptible en fonction de la modification des facteurs régissant le fonctionnement du système sol-plante.

* ORSTOM, B.P. 182 OUAGADOUGOU 01, BURKINA FASO

II - APPROCHE MORPHOLOGIQUE

Intérêt d'une telle approche

L'organisation de la partie supérieure des sols cultivés est souvent caractérisée par une variabilité importante, spatiale et temporelle. La prise en compte de cette variabilité est souvent plus pertinente pour la compréhension des mécanismes de fonctionnement du sol que ce que l'on peut attendre de l'utilisation de moyennes statistiques. L'observation morphologique assure une perception immédiate, et dans une certaine mesure quantifiable, de cette variabilité.

Les mesures physiques effectuées in situ ou sur échantillons non remaniés n'ont de sens que si elles concernent des volumes pédologiques homogènes bien identifiés dans le schéma général de l'organisation spatio-temporelle du sol établi grâce aux observations morphologiques.

L'agronome utilise l'approche morphologique comme un outil d'aide à la décision en matière de techniques culturales, de conseil aux agriculteurs, d'évaluation des risques encourus tant au niveau des propriétés du sol que des rendements

La méthode du Profil cultural

Mise au point il y a plus de trente ans (HENIN et al.-1969), la méthode d'examen diagnostic du profil cultural a été perfectionnée de façon à devenir un outil de recherche efficace pour l'étude, d'une part des relations sol-techniques culturales (MANICHON-1982), d'autre part des relations entre état du sol et comportement des peuplements végétaux (TARDIEU et MANICHON-1986). La méthode a été codifiée (GAUTRONNEAU et MANICHON-1987) et adaptée au milieu tropical, avec le souci de concilier point de vue des agronomes et savoir-faire des pédologues (BLIC-1990).

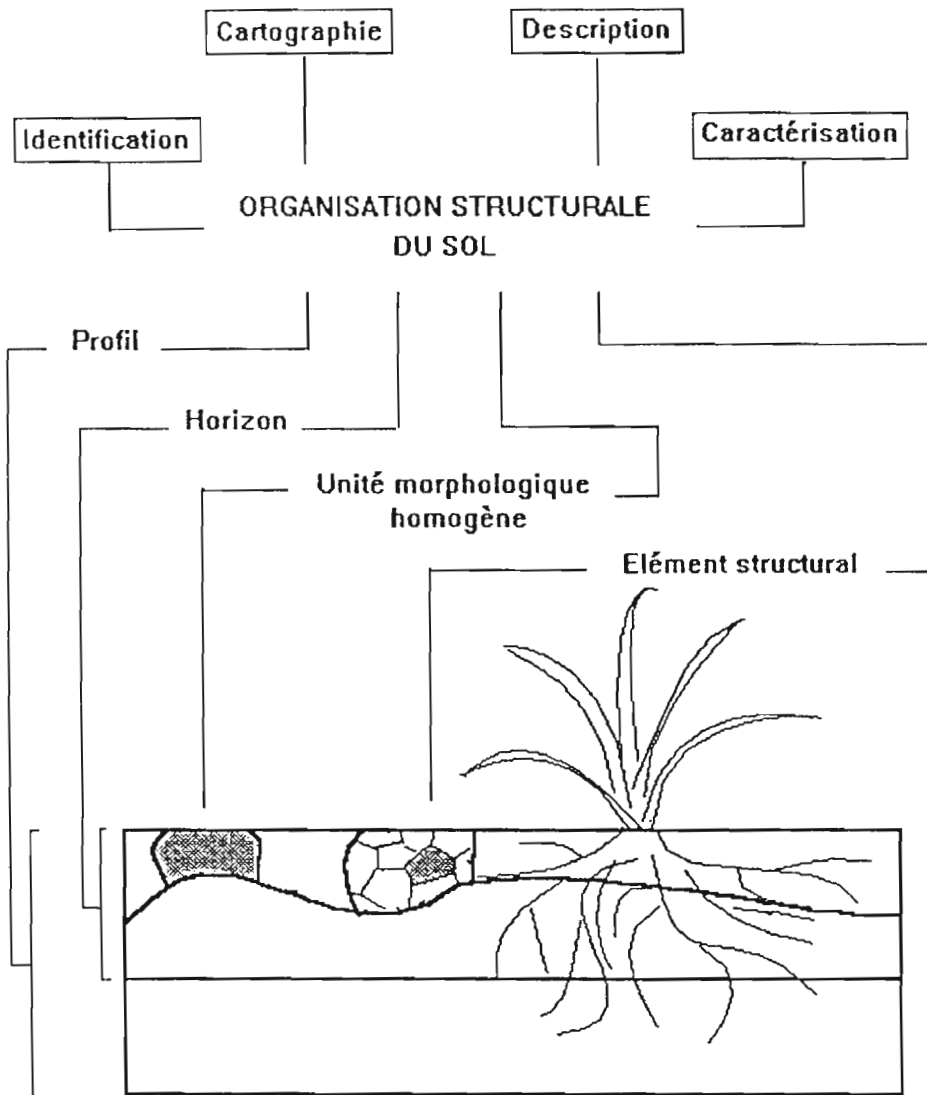
Quatre niveaux peuvent être reconnus dans l'organisation macrostructurale du sol (Figure 1) : le profil cultural, l'horizon, l'unité morphologique homogène (UMH) qui constitue l'unité de base de la description des sols, l'élément structural. Les UMH sont identifiées et cartographiées sur la face d'observation verticale de la fosse pédologique. C'est la macrostructure qui constitue le critère d'identification immédiate des UMH ; sa description est donc nettement privilégiée. Elle est complétée par l'évaluation d'autres paramètres, tels que la compacité, et par l'observation du système racinaire.

La carte structurale est un document de base à partir duquel on peut, par exemple, quantifier les types de macrostructures présents dans un horizon ou une épaisseur donnée de sol. Cela permet :

- De comparer les schémas structuraux correspondant, sur un même sol, à des contextes végétaux et/ou culturels différents (Tableau I).
- D'évaluer le caractère contraignant de certains états structuraux (tassements par exemple) et de suivre leur évolution au cours du temps.
- D'étudier en parallèle des séquences évolutives structurales et végétales (dynamique des jachères, par exemple).

C'est là un premier niveau, immédiat, d'utilisation des données de l'observation morphologique.

Fig. 1 - Analyse du Profil cultural



en relation avec morphologie et répartition des racines

Tableau I
Répartition des structures (%) dans les 20 cm supérieurs du
sol suivant leur type et leur degré de développement

Traitement \ Structure	Jachère naturelle	Manioc traditionnel	Manioc mécanisé	Mais/Soja intensif
Grumeleuse	25	21	11	15
Polyédrique	75	63	11	20
Motteuse	-	16	71	57
Massive	-	-	7	8
Très nette	57	34	65	60
Nette	43	66	26	24
Peu nette	-	-	2	8
Massive	-	-	7	8

Source : Essai IBSRAM Sol/Manioc, vallée du Niari, 1989

Les limites de la méthode

Extrapolation des observations : comme il n'est pas question de multiplier les fosses d'observation (méthode lourde et destructrice), on est conduit à essayer de corrélérer les schémas structuraux observés à l'intérieur du sol avec d'autres indices, tels que les états de surface, l'aspect et le comportement des peuplements végétaux, l'histoire de la parcelle.

Quantification des observations : confrontés, au cours d'inventaires pédologiques, à la nécessité d'évaluer les aptitudes culturales des sols, les pédologues ont souvent tenté d'estimer certains paramètres et comportements du sol à partir des observations morphologiques (McKEAGUE et al.-1988). Dans le cadre d'études de fonctionnement menées à l'échelle de la parcelle, il est fort contestable qu'une telle démarche puisse remplacer la mesure directe des phénomènes mis en cause.

Dépendance des observations : l'approche morphologique reste, malgré la codification des observations, empreinte d'une certaine subjectivité. Son efficacité paraît souvent liée à l'expérience et au savoir-faire du praticien. D'où l'intérêt d'associer approche morphologique et mesures de l'état structural.

III - METHODE D'ETUDE DE LA MACROSTRUCTURE

L'étude de la macrostructure du sol en relation avec le fonctionnement des peuplements végétaux (cultures, jachères) implique que l'on ait au préalable,

- caractérisé l'organisation pédologique du paysage,
- retracé aussi rigoureusement que possible l'histoire du milieu étudié afin de distinguer les caractères hérités de ceux qui sont liés à l'utilisation actuelle des sols.

L'approche morphologique fournit ensuite un schéma structural du sol à partir duquel on peut,

- d'une part, mesurer in situ un certain nombre de paramètres structuraux dont la pertinence a été suggérée par les traits morphologiques observés dans le sol,
- d'autre part, sélectionner et extraire des échantillons représentatifs des différents niveaux d'organisation étudiés (UMH, élément structural) en vue de procéder au laboratoire à diverses mesures et tests de comportement de la macrostructure.

Caractérisation de l'organisation pédologique

Cette première étape consiste à analyser, au moyen de toposéquences, la différenciation spatiale des sols sur un échantillon représentatif du paysage. Cet échantillon peut être défini sur des critères géographiques (versant, petit bassin versant), agronomiques (périmètre agricole, champ d'essai), socio-économiques (terroir villageois), écologiques (peuplements végétaux).

Cette démarche qui privilégie l'étude des limites séparant les diverses structures pédologiques est plus connue sous le nom de "Analyse structurale tridimensionnelle de la couverture pédologique" (BOULET et al.-1982 ; RUELLAN et al.-1989). Elle permet notamment d'établir les rapports existant entre les propriétés et comportements observés sur les différents compartiments du paysage.

Les stations d'observation

Le choix de leur implantation est fonction, d'une part des modes d'utilisation étudiés (techniques culturales, jachères), d'autre part de l'organisation pédologique du paysage.

La station d'observation représente, au moment où sont effectuées les observations, une unité homogène au point de vue du sol, du peuplement végétal et de l'utilisation humaine. En zone de cultures, son échelle de définition est généralement celle du champ. Dans les jachères, l'implantation des stations doit tenir compte de l'ancienneté relative des peuplements ainsi que de la répartition spatiale des espèces et groupes d'espèces végétales.

La description des stations est effectuée par les différents intervenants. En l'absence de spécialistes dans les différents domaines concernés, on peut retenir les variables suivantes :

- Structure du couvert végétal, pourcentage de recouvrement estimé visuellement.
- Résidus végétaux.
- Microrelief.
- Etats de surface (y compris les constructions de la mésofaune) dont on peut effectuer une cartographie détaillée (CASENAVE et VALENTIN-1989).

Description et mesure de la macrostructure

1°) Choix et préparation des emplacements

L'observation du profil cultural nécessite le creusement de fosses d'observation rectangulaires dont l'emplacement et le nombre sont guidés par l'hétérogénéité apparente de la station. Dans le cas de cultures en ligne, les fosses sont implantées perpendiculairement aux lignes.

La longueur de la face d'observation est réglée de manière à prendre en compte la variabilité latérale d'échelle métrique (minimum 2m). Sa hauteur est fonction de la différenciation pédologique verticale et de l'enracinement de la végétation (Fig. 1).

2°) Description du profil cultural

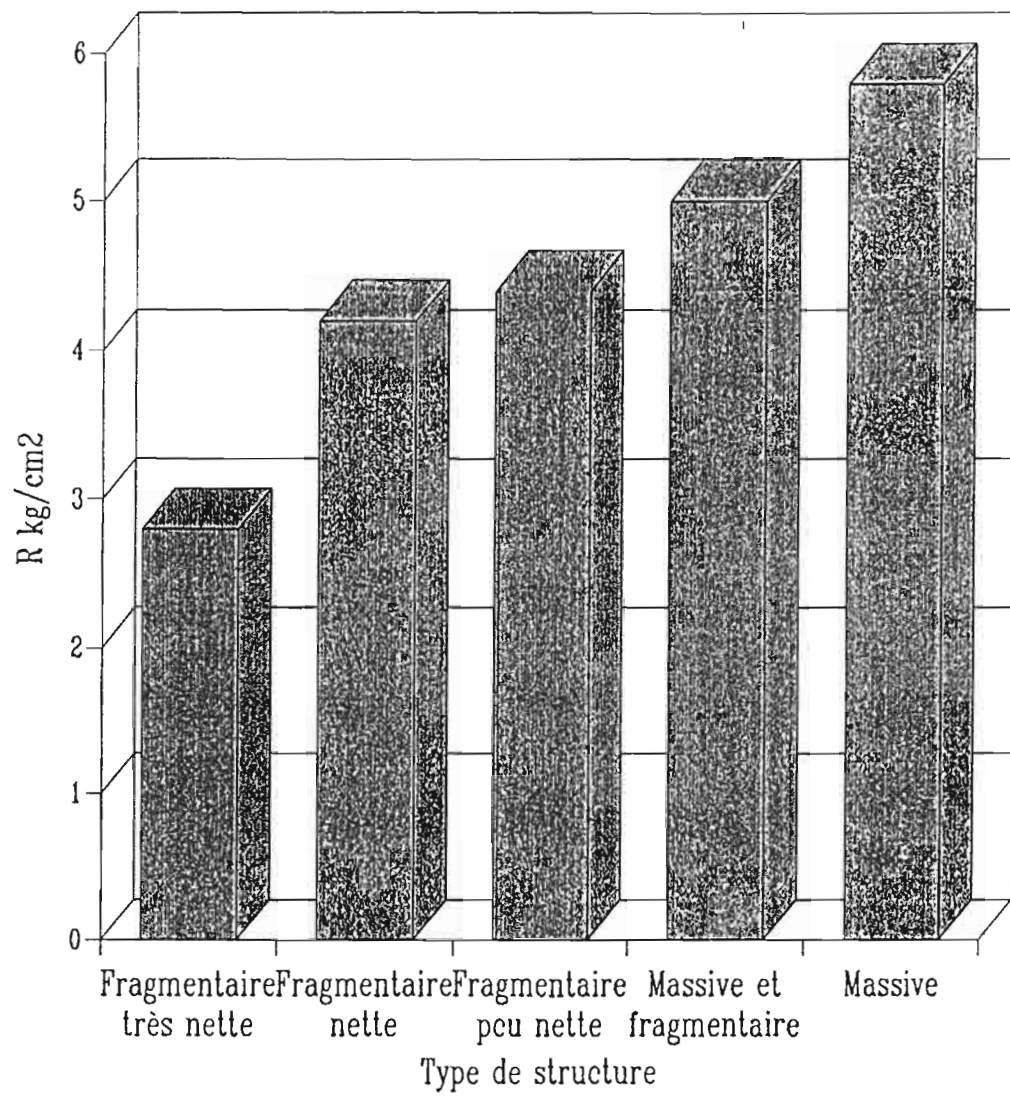
Mise en évidence et cartographie, sur la face d'observation du profil, des unités morphologiques homogènes (UMH) définies précédemment. Ces UMH se différencient par leur état structural et/ou leur compacité. L'évaluation de ce dernier critère est facilitée par l'utilisation d'un pénétromètre de poche, comme le montre l'exemple suivant tiré d'une étude en cours au Burkina Faso sur l'évolution de la structure de sols ferrugineux tropicaux lessivés en fonction du stade de la jachère (Fig. 2).

3°) Densité apparente des UMH

Les mesures sont effectuées in situ et sur mottes et agrégats ramenés au laboratoire, de façon à identifier et mesurer les porosités texturale et structurale.

L'exemple suivant, tiré d'une étude menée au Congo sur sols ferrallitiques jaunes argileux fortement désaturés, compare les valeurs de densité apparente mesurées in situ (au moyen de cylindres de 250cc) et les caractères morphologiques des UMH : type de structure et consistance appréciée suivant la résistance plus ou moins grande opposée à l'enfoncement d'une lame de couteau

Fig. 2- Structure et Résistance à la pénétration



(Tableau II).

Dans cet exemple, l'utilisation du test de Mann-Whitney met en évidence des différences hautement significatives entre les populations de densités apparentes correspondant aux différentes classes de consistance. Il en va généralement de même pour les types de structure ; seules les structures polyédrique et massive ne se différencient pas de façon significative selon le critère densité apparente.

4°) Mesure de la macroporosité par désorption d'eau

Des échantillons non perturbés sont prélevés dans les UMH dont on désire analyser plus finement la macroporosité. Les courbes de pF eau sont établies aux basses tensions d'humidité (sur un bac à sable) en vue d'estimer la répartition des macro et mésopores selon leur diamètre. Basée sur l'utilisation d'un modèle capillaire qui assimile les pores à des tubes cylindriques isodiamétriques (pores équivalents), la méthode par désorption d'eau implique que la géométrie de l'espace poral ne varie pas significativement en fonction de l'humidité ; elle est surtout applicable aux matériaux rigides pauvres en colloïdes argileux. Son domaine d'utilisation se situe dans une gamme de diamètres poraux compris entre 30 μm et 200 μm .

L'exemple suivant, tiré d'une étude en cours au Burkina Faso sur sols ferrugineux tropicaux lessivés, compare les distributions dimensionnelles des pores obtenues par désorption d'eau sous culture et sous divers groupements végétaux caractéristiques d'une séquence évolutive observée dans une jachère herbacée (Fig. 3).

5°) Caractérisation morphométrique de la macroporosité

La méthode précédente devient très imprécise pour des diamètres de pore supérieurs à 200 μm . Elle ne convient donc pas à la caractérisation de toute une gamme de macropores - souvent d'origine biologique - susceptibles de jouer un rôle essentiel vis à vis des écoulements préférentiels rapides et de la pénétration racinaire. En outre, elle ne renseigne pas sur la morphologie des vides qui est un paramètre important de l'organisation structurale du sol.

Les techniques d'analyse morphométrique permettent généralement de surmonter ces difficultés ; elles représentent la seule véritable alternative aux méthodes physiques pour la caractérisation de la macroporosité grossière et de la bioporosité (RINGROSE-VOASE-1987).

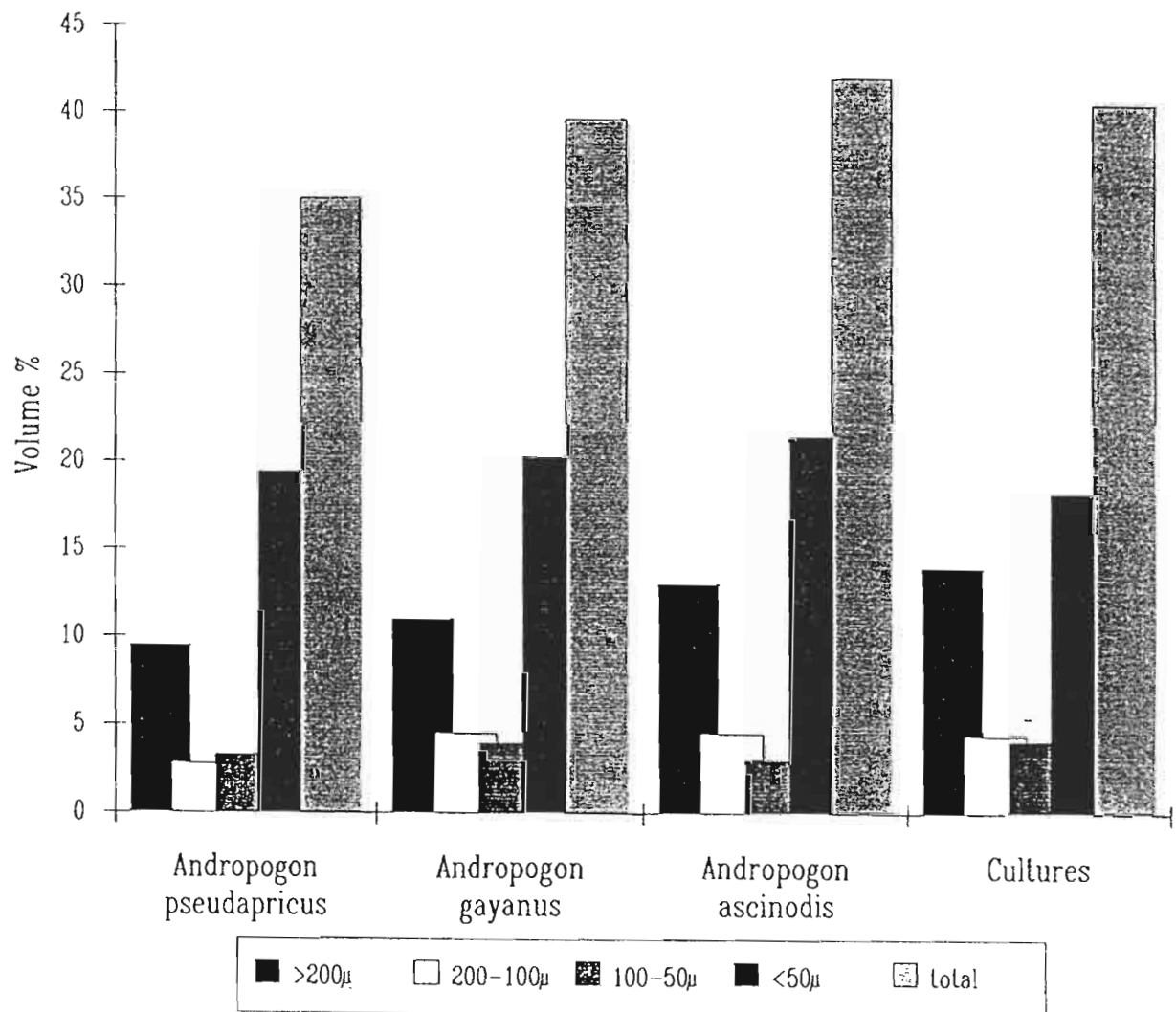
Des échantillons de sol non perturbés sont imprégnés avec une résine additionnée d'un pigment fluorescent. Après durcissement, on confectionne une tranche polie qui est photographiée en lumière ultra-violette pour mettre en évidence le système poral. Le rapport d'agrandissement est choisi de façon à concilier un champ d'observation suffisamment étendu avec une bonne définition des macropores dans la gamme de tailles retenue (>150 μm , par exemple). L'image obtenue est ensuite analysée en vue de déterminer les caractéristiques morphométriques de l'espace macroporal (MORAN et al.-1989 ; MURPHY et al.-1977).

Tableau II
Classes de compacité, types de structure et densité apparente

	Effectif	da médiante	Intervalle contenant au moins 80 % des observations
Meuble	9	0,79	0,71 - 0,85
Peu compact	31	0,88	0,80 - 1,01
Assez compact	21	1,06	0,88 - 1,14
Assez compact à Compact	8	1,12	0,98 - 1,24
Compact et Très compact	32	1,26	1,15 - 1,33
Structure grumeleuse	27	0,84	0,78 - 1,01
Structure motteuse	24	0,95	0,84 - 1,11
Structure polyédrique	39	1,21	0,91 - 1,32
Structure massive	11	1,18	1,14 - 1,32

Source : Essai IBSRAM Sol/Manioc, vallée du Niari, 1989

Fig 3 - Distribution dimensionnelle des pores sous culture de mil et sous jachères herbacées



Macrostructure et développement racinaire

Il est souvent intéressant d'effectuer une cartographie simultanée des macrostructures identifiées dans le profil cultural et du système racinaire de la couverture végétale (BLIC-1987 ; TARDIEU et MANICHON-1986, 1987).

On procède à un relevé des impacts racinaires sur la face d'observation du profil en s'aidant d'un grillage à maille carrée et en utilisant un système de notation normalisé fondé sur des caractères tels que le diamètre des racines, leur morphologie, l'abondance des radicelles, etc.

A partir des cartes racinaires on peut calculer un certain nombre de paramètres et d'indices caractéristiques de la géométrie du système racinaire : densité, régularité, courbe densité-profondeur, distribution latérale, par exemple.

Macrostructure et infiltration

Dans les régions tropicales sèches caractérisées par des pluies orageuses de forte intensité, la capacité d'infiltration du sol est un critère particulièrement pertinent de l'état structural. Deux techniques simples à mettre en oeuvre permettent une évaluation satisfaisante de la macrostructure :

1°) Infiltration d'une lame d'eau superficielle

Le paramètre recherché étant d'ordre structural plutôt qu'hydrodynamique, les mesures peuvent être simplifiées et miniaturisées ce qui permet de les multiplier tant en surface qu'au sein des profils.

En pratique, on dispose sur la surface étudiée des cylindres en tôle de 10 à 15 cm de diamètre puis, après les avoir légèrement enfoncés et remplis d'eau, on note le temps d'infiltration d'une lame d'eau de 10 cm. Ces mesures peuvent être avantageusement couplées avec le prélèvement d'échantillons de sol non perturbés.

Le tableau suivant présente les résultats de mesures effectuées à la surface du sol sous diverses couvertures végétales dans la région de BOUAKE (Côte d'Ivoire) ; chaque valeur représente la médiane de 15 mesures.

2°) Infiltration sous des tensions d'eau négatives

On utilise des infiltromètres pouvant délivrer l'eau sous des tensions négatives (ou succions) réglables. La gamme de réglage des tensions permet, en accord avec la théorie de la capillarité, d'estimer la répartition de la macroporosité fonctionnelle selon le diamètre des pores.

En pratique, on procède à plusieurs séries d'infiltrations au même endroit, sous différentes tensions d'eau, chaque infiltration étant poursuivie jusqu'à obtention d'un régime permanent. La comparaison des différentes valeurs de conductivité hydraulique ainsi obtenues permet d'évaluer la contribution des macropores de différents diamètres au processus d'infiltration. On peut, en appliquant la formule de Poiseuille, en déduire les valeurs correspondantes de macroporosité fonctionnelle (WATSON et LUXMOORE-1986; SAUER et al.-1990).

IV - CONCLUSION

J. Bouma, dans un article récent (BOUMA-1990), regrette que l'on n'accorde pas assez d'importance à la morphologie des sols avant de définir des schémas d'échantillonnage et des méthodologies d'analyse. Il est en effet très rare de trouver dans les revues de science du sol ou d'agronomie de langue anglaise une caractérisation physico-chimique du sol qui soit guidée par une analyse morphologique préalable de la variabilité inter et intrahorizon.

Grâce à S. Hénin, l'école française d'agropédologie a eu depuis plus de trente ans la chance d'être sensibilisée à l'importance que revêt l'examen du profil cultural préalablement à toute caractérisation analytique. Assez couramment utilisée en France actuellement, nous venons de le voir, l'approche morphologique semble par contre un peu oubliée dans les régions tropicales, peut être parce qu'elle s'y démarque moins bien de la pédologie dite "générale".

Les quelques réflexions qui ont précédé ont essayé de montrer l'intérêt que présente pour l'étude des macrostructures dans les sols tropicaux cultivés une démarche associant l'approche morphologique familière au pédologue et les méthodes physiques propres à mesurer l'organisation des constituants du sol ou certaines propriétés en découlant.

C'est ainsi que l'approche morphologique couplée à des mesures de l'espace macroporal semble particulièrement pertinente pour étudier le comportement physique des sols peu structurés des régions tropicales sèches.

BIBLIOGRAPHIE

BLIC (P. de), 1987. - Analysis of a cultivation profile under sugarcane : methodology and results. In : Land development and management of acid soils in Africa. IBSRAM Proceedings, n°7, Bangkok : 275-285.

BLIC (P. de), 1990. - L'examen du profil cultural : un outil pour mieux comprendre le comportement du sol soumis à des travaux aratoires. In : Organic matter management and tillage in humid and subhumid Africa. IBSRAM Proceedings, n°10, Bangkok : 385-399.

BOULET (R.) et al., 1982. - Analyse structurale et cartographie en pédologie. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., 19 (4) : 309-351.

BOUMA (J.), 1990. - Using morphometric expressions for macropores to improve soil physical analyses of field soils. Geoderma, 46 : 3-11.

CASENAVE (A.), VALENTIN (C.), 1989. - Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. ORSTOM, Paris, 229 p.

GAUTRONNEAU (Y.), MANICHON (H.), 1987. - Guide méthodologique du profil cultural. CEREF- GEARA, 71 p.

HENIN (S.), GRAS (R.), MONNIER (G.), 1969. - Le profil cultural. 2è édition, Masson, Paris, 332 p.

- MANICHON (H.), 1982. - L'action des outils sur le sol : appréciation de leurs effets par la méthode du profil cultural. Sc. du Sol, 3 : 203-219.
- McKEAGUE (J.A.), WANG (C.), COEN (G.M.), 1988. - Description et interprétation de la macrostructure des sols minéraux. Rapport préliminaire, Agriculture Canada, Bull. techn. 1986-2F, 57 p.
- MORAN (C.J.), McBRATNEY (A.B.), KOPPI (A.J.), 1989. - A rapid method for analysis of soil macropore structure. I - Specimen preparation and digital binary image production. Soil Sci. Soc. Am. J., 53 : 921-928.
- MURPHY (C.P.), BULLOCK (P.), TURNER (R.H.), 1977. - The measurement and characterisation of voids in soil thin section by image analysis. Part I - Principles and techniques. J. of Soil Sci., 28 : 498-508.
- RINGROSE-VOASE (A.J.), 1987. - A scheme for the quantitative description of soil macrostructure by image analysis. J. of Soil Sci., 38 : 343-356.
- RUELLAN (A.), DOSSO (M.), FRITSCH (E.), 1989. - L'analyse structurale de la couverture pédologique. Sc. du Sol, 27 (4) : 319-334.
- SAUER (T.J.), CLOTHIER (B.E.), DANIEL (T.C.), 1990. - Surface measurements of the hydraulic properties of a tilled and untilled soil. Soil Tillage Res., 15 : 359-369.
- STENGEL (P.), 1979. - Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique du sol in situ. Ann. Agron., 30 (1) : 27-49.
- STENGEL (P.), 1990. - Caractérisation de l'état structural du sol. Objectifs et méthodes. In : La structure du sol et son évolution. Les colloques de l'INRA, n°53:15-36.
- TARDIEU (F.), MANICHON (H.), 1986. - Caractérisation en tant que capteur d'eau de l'enracinement du maïs en parcelle cultivée. II - Une méthode d'étude de la répartition verticale et horizontale des racines. Agronomie, 6 (5) : 415-425.
- TARDIEU (F.), MANICHON (H.), 1987. - Etat structural, enracinement et alimentation hydrique du maïs. II - Croissance et disposition spatiale du système racinaire. Agronomie, 7 (3) : 201-211.
- WATSON (K.W.), LUXMOORE (R.J.), 1986. - Estimating macroporosity in a forest watershed by use of a tension infiltrometer. Soil Sci. Soc. Am. J., 50 : 578-582.

RESUME

L'organisation macrostructurale du sol régit les transferts hydriques rapides et exerce une influence qui peut être déterminante sur le développement du système racinaire. Elle est étroitement liée aux techniques culturales et à la faune du sol.

Après avoir discuté l'intérêt et les limites d'une approche morphologique, une méthode d'étude est présentée qui associe étroitement description de la macrostructure et mesures physiques réalisées in situ et sur échantillons non remaniés.

Une première démarche consiste à caractériser, par la méthode des toposéquences, la couverture pédologique à l'échelle du versant. Des stations d'étude sont ensuite identifiées et décrites à l'échelle du champ.

Au cours des étapes suivantes, l'organisation macrostructurale est décrite et mesurée, d'abord à l'échelle du profil cultural, puis à celle des unités morphologiques homogènes, c'est à dire de volumes de sol individualisés dans le profil et se distinguant les uns des autres par leur état structural.

En fonction des objectifs recherchés, l'organisation macrostructurale du sol peut être mise en relation avec la morphologie du système racinaire et/ou avec la capacité d'infiltration mesurée in situ.

ABSTRACT

Soil macrostructural organisation : interest and limits of a morphological approach, method of characterisation.

Soil macrostructure is undoubtedly one of the most important soil characteristics insofar as it is mainly concerned with rapid water flows and root development and closely related to tillage practices and faunal activity.

This report starts with some discussion about interest and limits of a morphological approach of macrostructure. Then, a method of evaluating soil macrostructure is presented which tightly associates morphological approach with physical measures achieved in situ and in the laboratory.

The proposed step consists in the following stages :

- 1- Analysis of soil mantle organisation by means of toposequences.
- 2- Settling and description of studying stations representative of the soil-plant system at the scale of the field.
- 3- Macrostructure description and measuring at pedon and lower organisation levels.
- 4- Characterisation of some plant-soil parameters closely related to macrostructure, i.e. morphology of rooting system and infiltration rate.